

2H01 宇宙機環境プラズマ解析コードの開発

○村中崇信 (JAXA)、上田裕子 (JAXA)、白井英之 (京大)、篠原育 (JAXA)

Development of Spacecraft Environment Plasma Analysis Code

Takanobu Muranaka (JAXA), Hiroko O. Ueda (JAXA), Hideyuki Usui (Kyoto Univ.),
and
Iku Shinohara (JAXA)

Key Words: Spacecraft Environment, Spacecraft Charging, Ion Engine, 3-D PIC Simulation

Abstract

A three-dimensional Particle-In-Cell plasma code is now being developed to analyze spacecraft-plasma interaction qualitatively. The goal of the development of the code is that we can analyze spacecraft charging and interaction between spacecraft and ion engine plasma plume by using the code. At present, we developed fundamental function for spacecraft charging in the code and validated the numerical results by comparing other numerical results and experimental ones. The application of the code to an analysis of plasma probe on a spacecraft is scheduled using these results. In this paper, we mentioned about these results and the overall development tasks of the code.

1. 目的および背景

2003年10月に発生した宇宙機帯電・放電現象に起因する極軌道衛星 ADEOS-II の全損事故以来^{1,2}、日本国内でも宇宙機帯電を定量的に評価出来る解析ツールの必要性が再認識された。宇宙機帯電・放電現象は、宇宙機保全に大きく関係するという点で、宇宙機とプラズマとの相互作用を考える上で最も重要な事象であると言える。従来、日本を含む多国では、衛星設計段階で実際に使用する帯電解析ツールとして、米国で開発された NASCAP/GEO、NASCAP/LEO^{3,4}、POLAR⁵ が静止軌道、低軌道、極軌道それぞれの宇宙環境に対して使用されてきた。しかしながら、これらのツールは開発されて20年以上の年月が経過し、近年大きな発展をみた計算機技術の見地からは既に過去のもの言わざるを得ない状態であった。

一方世界では、次世代の宇宙機帯電解析ツールの開発が既になされていた。アメリカは NASCAP の後継ツールである NASCAP-2k⁶ を2000年に開発し、ヨーロッパでは SPIS⁷ と呼ばれる帯電解析ソフトウェアの開発が2003年から開始されていた。これらの背景を受けて、日本でも独自の次世代宇宙機帯電解析ツールの開発が開始された。このうち、MUSCAT (Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool)⁸⁻¹⁰ は、日本の衛星設計段階で使用される事を前提に設計さ

れ、日本の宇宙機関の協力体制を得て2004年11月から開発がスタートし、2007年3月に完成の運びとなった。MUSCAT の特徴は、独自の Graphical User Interface (GUI) による3次元宇宙機モデリング機能、パラメータ入力機能、計算制御機能を有し、計算初心者でも非常に扱い易いツールとなっている点である。また、解析エンジンにも詳細な物理モデルと高速計算性という相反する機能を有し、ワークステーション程度の計算資源で計算を実行可能となるように設計されている。現在 MUSCAT は JAXA 内等で使用され、実機の帯電解析にも適用されている。

同時期にこれとは別に、宇宙環境シミュレータ (GES) グループによって、大規模計算による宇宙機と宇宙環境の相互作用を解析する試みがなされていた¹¹。このグループの研究では大規模演算装置である地球シミュレータを使用し、電子運動論的效果を含めた粒子的プラズマモデルを用いて、宇宙環境プラズマと宇宙機の相互作用を可能な限り正確に解析しようとする試みであった。MUSCAT が完成し、衛星設計段階で実用的な日本の標準ツールが完成した現在、GES グループの研究目的であった宇宙機と宇宙機環境プラズマの詳細な解析を継続することは科学的見地から非常に有意義であると言える。そこで、本グループではこの研究を基本として、また、MUSCAT 開発で得られた知見を活用する事で、大規

模計算による新たな宇宙機環境シミュレーションコードを開発する事を目標とする。本コード開発の主眼は次の2点に置いている。ひとつは、MUSCATと同様に宇宙機帯電現象の解析が可能である点、そして、もうひとつは、イオンエンジンに代表される、宇宙機からの能動的プラズマ放出を解析可能であるという点である。特に後者は、近年の宇宙探査で使用されるイオンエンジンが1kWを超える高出力であり、このようなシステムから放出されるプラズマと宇宙機が相互作用することを考慮すると、その必要性は明らかである。本グループでは最終的にこれら2つの解析機能を有する新しいシミュレーションコードの開発を目指している。

2. コードの基本原則

2-1 コードの基本仕様

本コードの基本仕様を以下に述べる。現在これらに基づいてコードの開発を進めている。

- 1) イオンと電子を粒子として解く。
- 2) 計算体系は3次元として、矩形格子を採用する。
- 3) 電磁場については、静電場のみ解く。
- 4) 計算体系内に、3次元宇宙機モデルを導入出来る事。
- 5) 衛星軌道上などの、宇宙機環境プラズマを再現出来る事。
- 6) 宇宙機帯電を計算出来る事。
- 7) イオンエンジンなどの、宇宙機からの能動的プラズマ放出の影響を計算出来る事。

1) について、膨大な計算資源を要する一方、イオンに加えて、電子の運動も粒子として自己無撞着に解くことで、宇宙機環境プラズマの詳細な解析を行うことが出来る。2)、3) について、矩形格子を採用する事で、フーリエ変換によりポアソン方程式を高速に解く事が可能となり、その結果、静電場を高速に求める事が出来る。4) について、宇宙機は矩形格子によってモデル化される。この部分については、MUSCAT 開発で得られた技術をもとに開発する計画としている。5) は、計算空間内に衛星軌道上に存在する環境プラズマに加え、宇宙機から放出される光電子、二次電子についても考慮する。5)、6) については、記述の通りである。

2-2 コードの基本原則

本コードは、3次元PIC法¹²によって、イオンおよび電子の運動を解いている。電子については前述し

た様に、宇宙環境プラズマ中の電子に加えて、宇宙機から放出される光電子、二次電子についても同様に解く。イオンおよび電子の運動方程式は、

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \vec{x}_j}{dt^2} &= \frac{q_j}{m_j} (\vec{E} + \vec{v}_j \times \vec{B}) \\ \frac{d \vec{x}_j}{dt} &= \vec{v}_j \end{aligned} \quad (1)$$

である。ここで、 x, v, q, m, E, B はそれぞれ、粒子位置、速度、電荷量、質量、電場、磁場を表す。また、添字 j はイオン、電子など、それぞれの個別の粒子種を示している。電磁場については、コード中では静電場のみ求める。従って、式(1)中の磁場は初期条件で計算空間に導入される静磁場を表している。

空間電位はポアソン方程式、

$$-\epsilon_0 \nabla^2 \phi = \rho \quad (2)$$

を解く事によって求められる。電場は電位の勾配を計算する事で得られる。ここで、 ϕ, ρ はそれぞれ、電位、電荷密度を示す。また、宇宙機表面における電位計算は Capacitance Matrix 法¹³を使用している。

3. 基本機能の検証

開発中のコードについて、基本機能の検証を行った。現在本コードによって、導体から構成される単純衛星モデルについて、宇宙機環境中での浮動電位を計算する事が出来る。ここでは、理論値、実験値、また、他の計算コードによる計算結果との比較によってこの基本機能を検証した。

計算に使用したプラズマパラメータおよび、計算パラメータを表1に示す。

表1 プラズマパラメータと計算パラメータ

プラズマ密度 [m ⁻³]	3x10 ¹²
プラズマ温度 [eV]	2
イオン電子質量比 (Xe)	240516
Debye長 [m]	6.0x10 ⁻³
計算体系格子数	64x64x64
衛星モデル格子数	10x10x10
空間刻み幅 [m]	7.0x10 ⁻³
時間刻み幅 [s]	3.0x10 ⁻⁹

はじめに、単純立方体衛星モデルについて、本コードを使用して得られた浮動電位の計算結果を図1

に示す。ここで、プラズマの初期分布はイオンと電子にそれぞれについて、空間分布は一様とし、速度分布は Gaussian で与えている。シース長が物体のスケール長と比較して十分小さい場合、浮動電位の理論値は、

$$V_f = -(kT_e / e) \ln(m_i / m_e)^{1/2} \quad (3)$$

と記述できる¹⁴。ここで、 V_f , T_e , m_i , m_e はそれぞれ、浮動電位、電子温度、イオン質量、電子質量である。式(3)より、浮動電位の理論値は $V_f = -12.40$ (V) と求まり、これはシミュレーション結果と良い一致を示す。また、図2に示すように、MUSCATでの計算

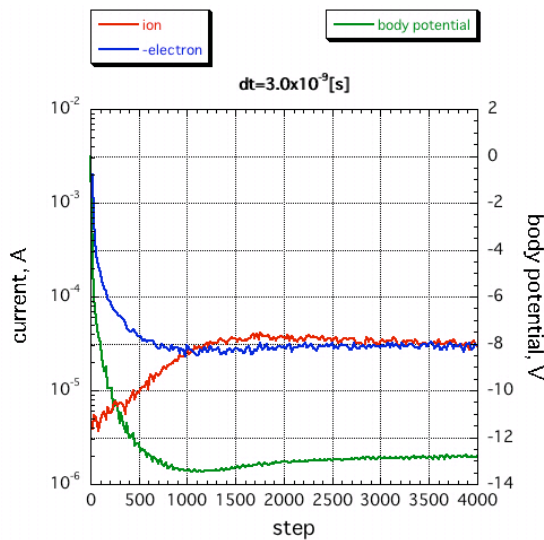


図1 本コードによる衛星モデルの浮動電位と収集した背景イオン、背景電子電流の時間履歴

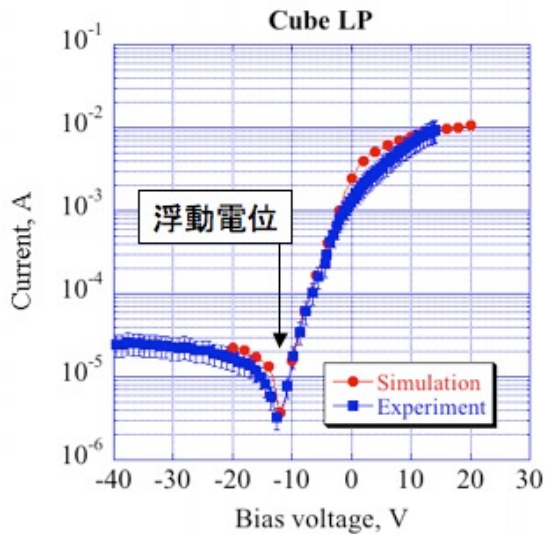


図2 MUSCATによる計算と、その検証実験によって得られた電流電圧特性曲線

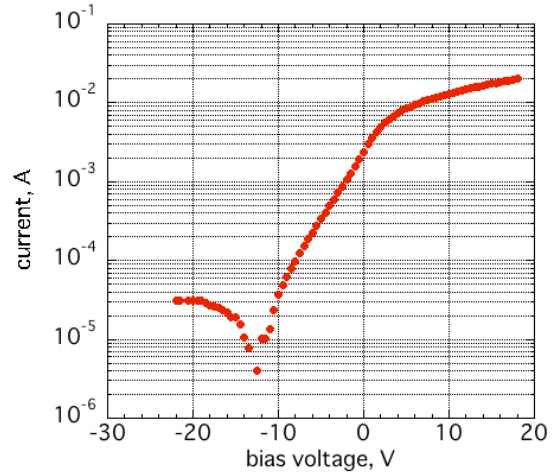


図3 本コードの電流電圧特性曲線

結果と、その検証実験結果による電流電圧特性曲線¹⁵から得られる浮動電位の値とも良い一致を示している。図3に本コードによって得られた電流電圧特性曲線を示す。これと、図2を比較すると、本計算結果の方が電流を多く収集していることが見て取れる。この結果については粒子流入条件の違いに起因すると考えられている。MUSCATでは外部境界から計算体系内に一定フラックスでプラズマを流入させているが、一方で、本コードでは便宜上、計算体系内における計算粒子数を固定し、この内1ステップ内に消滅した分だけ外部境界から補充する手法をとっている。粒子流入の扱いは固定フラックスとする方針である。しかし、図3から、特性曲線の傾向と各電圧に対するおよその収集電流値は良い一致を示していると言える。

次に、浮動導体が複数ある場合について浮動電位計算を行った。計算モデルは、大きさ $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 1\text{cm}$ である同一形状の板状の導体を、表1に示したプラズマ環境中に3つ置いた場合を仮定し、この条件でそれぞれの浮動電位を計算した。但し、3つの導体のうち一つについては、面の一つをこの導体浮動電位に対して、 -4V バイアス電位が保持される様に設定している。図4にこれらの導体の浮動電位計算の結果を示す。図5に示す様に、導体3の面のうち、バイアス電位を設定した面の電位と、この物体の浮動電位との電位差はバイアス電位に等しい -4V であることが確認できる。

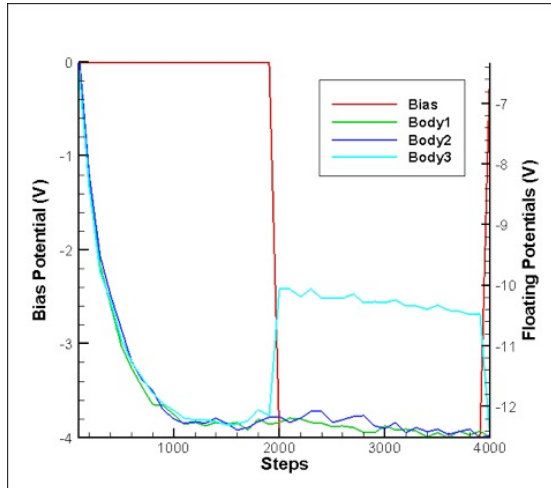


図4 浮動導体3つが存在する場合の各浮動電位計算結果。ここで、導体3の一つの面にはバイアス電位-4Vが設定されている。

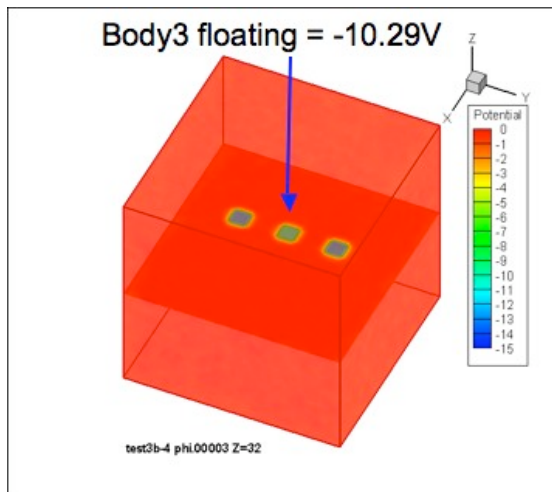
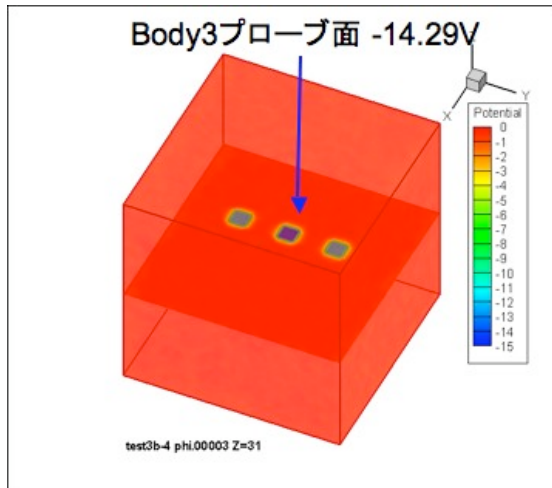


図5 パッチ状複数導体の浮動電位計算結果。中央の物体3については、-4V バイアス面の電位（上図）と、その裏面側の浮動電位（下図）が確認できる。これらの電位差はバイアス電位分の値に相当している。3000 ステップ時の計算結果。

4. コードの応用例と今後の開発計画

前節で述べた様に、現状のコードを使用して、複数の単純導体の浮動電位を計算する事が可能である。また、検証途中であるが、宇宙機が放出する光電子、二次電子に関する電子放出系についてのモデル化が終了している。この時点での本コードの応用計算として、宇宙機搭載電位プローブのシミュレーションを計画している。すでにパッチ型ダブルプローブモデルへの適用は試行されているが¹⁶、今後さらに定電流プローブモデルへの応用を計画している。

コード開発の最終目標としては、イオンエンジンから放出されるイオンビーム、あるいは、プラズマプルームの計算を実行することを計画している。

5. おわりに

本グループでは、GES グループによる宇宙機環境シミュレータ開発を継続し、大規模計算による宇宙機環境プラズマ解析コードを開発している。現在までに、その主たる目的の一つである宇宙機帯電計算について、単純形状モデルに対する浮動電位計算の実行と、検証作業が終了した。これと同時に、複数導体に対するそれぞれの浮動電位計算も実行可能である事を確認した。また、光電子、二次電子放出に対する電子放出モデルも構築した。これらをもって、衛星搭載型電位プローブへのコードの適用を計画している。また、将来的にはイオンエンジンから放出されるイオンビーム、また、プラズマプルームの解析までも可能とすべく、コードの開発を進めている。

本稿のシミュレーションは、JAXA スーパーコンピュータシステムである、NS システムによって実行された。

参考文献

- [1] Nakamura, M., "Space Plasma Environment at the ADEOS-II anomaly," *Proc. 9th Spacecraft Charging Technology Conf.*, Tsukuba, Japan, 4-8 April, 2005.
- [2] Kawakita, S., Kusawake, H., Takahashi, M. et al, "Investigation of Operational anomaly of ADEOS-II Satellite," *Proc. 9th Spacecraft Charging Technology Conf.*, Tsukuba, Japan, 4-8 April, 2005.
- [3] Mandell, M.J. and Katz, I., "High Voltage Plasma Interactions Calculations Using NASCAP/LEO," AIAA Paper 90-0725, 1990.
- [4] Mandel, M.J., Katz, I. Davis, V.A. and Kuharski, R.A., "NASCAP/LEO Calculations of Current Collection, in Current Collection from Space Plasmas," NASA CP 3089, 1990.
- [5] Murphy, G. and Katz, I., "The POLAR Code Wake Model: Comparison with in Situ Observations," J.

Geophys. Res., 94, pp. 9065-9070, 1989.

[6] Mandell, M. J., Katz, I., Hilton, J. M., Cooke, D. L., and Minor, J., "Nascap-2K Spacecraft Charging Models: Algorithms and Applications," *Proc. 7th Spacecraft Charging Technology Conf.*, Noordwijk, The Netherlands, 23-27 April, 2001.

[7] Forest, J., Eliasson, L., and Hilgers, A., "A New Spacecraft Plasma Interactions Simulation Software, PicUp3D/SPIS," *Proc. 7th Spacecraft Charging Technology Conf.*, Noordwijk, The Netherlands, 23-27 April, 2001.

[8] Hatta, S., Muranaka, T., Hosoda, S., Kim, J., Cho, M., Ueda, H. O., Koga, K., and Goka, T., "Progress of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT) and its Evolution for Space Exploration," IAC-06-D5.2.08, *Proc. 57th International Astronautical Congress*, Valencia, Spain, October 2006.

[9] Muranaka, T., Hatta, S., Kim, J., Hosoda, S., Ikeda, K., Cho, M., Ueda, H. O., Koga, K., and Goka, T., "Final Version of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT)," *Proc. 10th Spacecraft Charging Technology Conf.*, Biarritz, France, 18-21 June, 2007.

[10] Hosoda, S., Muranaka, T., Kim, J., Hatta, S., Kurahara, N., Cho, M., Ueda, H. O., Koga, K., Goka, T., and Kuninaka, H., "Verification of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT) via Laboratory Test," *Proc. 10th Spacecraft Charging Technology Conf.*, Biarritz, France, 18-21 June, 2007.

[11] Usui, H., Miyake, Y., Okada, M., Omura, Y., Sugiyama, T., Murata, K. T., Matsuoka, D., Ueda, H. O., "Development and Application of Geospace Environment Simulator for the Analysis of Spacecraft-Plasma Interactions," *IEEE Transactions on Plasma Science*, Volume 34, Issue 5, part2, Oct. 2006, pp2094- 2102, Digital Object Identifier 10.1109/TPS.2006.883290, 2006.

[12] Birdsall, C. K., and Langdon, A. B., *Plasma Physics via Computer Simulation*, McGraw-Hill, New York, 1985.

[13] Hockney, R. W., and Eastwood, J. W., *Computer Simulation Using Particles*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1988.

[14] プラズマ・核融合学界編, 「プラズマの生成と診断 (応用への道)」 4. 2章, コロナ社, 東京, 2004.

[15] Hosoda, S., Hatta, S., Muranaka, T., Kim, J., Kurahara, N., Cho, M., Ueda, H. O., Koga, K., and Goka, T., "Verification of Multi-Utility Spacecraft Charging Analysis Tool (MUSCAT) via Laboratory test," *Proc. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, USA, 2007.

[16] Ueda, H. O., Okada, M., Usui, H., and Imasato, K., "Electrostatic Full-Particle Simulations Modeling of REIMEI Satellite in Polar Orbit," *Proc. 10th Spacecraft Charging Technology Conf.*, Biarritz, France, 18-21 June, 2007.